中国生态农业学报 2017 年 9 月 第 25 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2017, 25(9): 1245−1253

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170739

曹凑贵, 江洋, 汪金平, 袁鹏丽, 陈松文. 稻虾共作模式的"双刃性"及可持续发展策略[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(9): 1245−1253
Cao C G, Jiang Y, Wang J P, Yuan P L, Chen S W. "Dual character" of rice-crayfish culture and strategy for its sustainable development[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(9): 1245−1253

稻虾共作模式的"双刃性"及可持续发展策略*

曹凑贵[1,2], 江 洋[1], 汪金平[1,2], 袁鹏丽[1], 陈松文[1]

(1. 华中农业大学农业部长江中游作物生理生态与耕作重点实验室 武汉 430070; 2. 长江大学主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心 荆州 434025)

摘 要: 近年来, 稻虾[水稻-克氏原螯虾(小龙虾)]共作模式由于其较高的综合效益而在全国范围内得以大力发展。其中以湖北省稻虾共作发展最为迅速, 面积大, 技术也较为成熟, 并形成了"潜江模式"。本文介绍了稻虾共作模式的特点及其发展情况, 以湖北省稻虾共作模式为研究对象, 采用产业调查, 结合试验示范和定位试验, 研究了稻虾共作模式的生产和生态效应, 重点分析了稻虾共作模式的"双刃性"。稻虾共作模式的"双刃性"主要体现在(1)稳粮增效, 但同时存在重虾轻稻的现象: 稻虾共作模式较传统水稻单作模式可增产4.63%~14.01%, 改善稻米品质, 但部分稻虾共作模式中忽略水稻的管理, 导致水稻产量偏低; (2)提高土壤肥力, 但同时加剧了土壤次生潜育化: 稻虾共作模式土壤中易氧化态有机碳(ROC)、全氮、全磷、全钾含量要高于传统水稻单作模式, 但稻虾共作模式土壤颜色偏暗, 土壤结构更为紧密, 潜育化明显; (3)涵养水源, 但同时可能增加水资源消耗: 稻虾共作模式中地下水位高的稻田水分利用率提高, 储水功能增强, 但地下水位低的稻田可能增加 50%~80%的耗水量; (4)减肥减药、提高水体养分含量, 但同时增加了水体富营养化的风险: 稻虾共作模式肥料和农药成本分别降低了 79.5%和 50.0%, 稻虾共作模式田面水的全氮、全磷含量及硝态氮、氨态氮含量均高于水稻单作; (5)虫害减轻, 但某些病害加重, 同时生物多样性发生变化: 稻虾共作模式螟虫发生减轻, 但基腐病加重, 生物多样性随共作年限先降低后又增高。根据以上现状与问题, 本研究提出了稻虾共作的模式优化及建议, 如因地制宜, 避免盲目发展; 研究标准, 规范化发展; 优化模式, 科学水肥调控; 因势利导, 防治病虫草害, 为稻虾共作模式的可持续发展提供依据。

关键词: 稻虾共作; 水稻产量; 土壤肥力; 水体质量; 病虫草害; 生物多样性
中图分类号: S344.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)09-1245-09

"Dual character" of rice-crayfish culture and strategies for its sustainable development*

CAO Cougui[1,2], JIANG Yang[1], WANG Jinping[1,2], YUAN Pengli[1], CHEN Songwen[1]

(1. Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation (The Middle Reaches of Yangtze River), Ministry of Education, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Grain Industry, Yangtze University, Jingzhou 434025, China)

Abstract: Rice-crayfish culture has been greatly developed in China in recent years due to its high comprehensive benefits. Especially, rice-crayfish culture has been rapidly developed in Hubei Province, where has a large area and proven technique of

* 国家重点研发专项(2017YFD0301400)和湖北省自然基金创新群体项目(2016CFA017)资助
曹凑贵, 主要研究方向为农业生态与可持续耕作制度。E-mail: ccgui@mail.hzau.edu.cn
收稿日期: 2017-07-29 接受日期: 2017-08-14

* This study was supported by the State Key Special Program (2017YFD0301400) and Hubei Natural Science Foundation (2016CFA017).
Corresponding author, CAO Cougui, E-mail: ccgui@mail.hzau.edu.cn
Received Jul. 29, 2017; accepted Aug. 14, 2017

rice-crayfish culture, and developed the "Qianjiang Mode". In this paper, we introduced the characteristics and the development of rice-crayfish culture, and studied the production and ecological effects of rice-crayfish culture in Hubei Province by investigation, demonstration and long-term experiment. And the "dual character" of rice-crayfish culture was illuminated. The "dual character" of rice-crayfish culture was mainly reflected by the following phenomena. (1) Rice-crayfish culture stabilized food synergy, but favored crayfish over rice. Rice yield of rice-crayfish culture was increased by 4.63%–14.01% compared with conventional rice culture, and the rice quality was improved. But sometimes the rice yield was decreased due to the poor management for rice. (2) Rice-crayfish culture improved the soil fertility, but aggravated the soil gleization. The contents of readily oxidizable organic carbon (ROC), total N, total P and total K in soil of rice-crayfish field were higher than those of conventional rice field, but soil color was darker, structure was tighter, the gleization was obvious. (3) The rice-crayfish culture conserved water, but in some cases increased water consumption. The water use efficiency and water conserving capacity in field with high groundwater level were higher, but water consumption was increased by 50%–80% in field with low groundwater level. (4) The rice-crayfish culture decreased fertilizers and pesticides application, increased water nutrient concentration, but also increased the risk of water eutrophication. The costs of fertilizers and pesticides were decreased by 79.5% and 50.0%, respectively. The total N, total P, nitrate-N and ammonia-N concentrations were higher in the surface water of rice-crayfish field. (5) The pests amounts were deceased, but some disease occurrence increased and biodiversity changed in rice-crayfish field. The lepidoptera pests were decreased, but the basal rot was heavier, and the biodiversity was decreased firstly, then increased by years in rice-crayfish culture. Finally, we made some suggestions for improving the rice-crayfish culture, such as adjusting managements to local conditions and decreasing blindness, standardizing development, optimizing pattern and regulating water and fertilizer utilization, and scientific control of disease, pests and weed. These suggestions may ensure the sustainable development of rice-crayfish culture.

Keywords: Rice-crayfish culture; Rice yield; Soil fertility; Water quality; Diseases, weeds and pests; Biodiversity

当前，我国农业正面临人均耕地面积减少、资源与环境约束加剧、保证粮食安全和农民增收难度越来越大等难题。近年来，湖北省潜江市创新发展出的“稻虾共作”[水稻(*Oryza sativa*)与克氏原螯虾(小龙虾，*Procambarus clarkia*)共作]生态种养高效模式，被农业部誉为“现代农业发展的成功典范，现代农业的一次革命”[1]。该模式的综合效益主要体现在农业增效上，实现了“一水两用、一田双收、稳粮增收、一举多赢”，有效提高了农田资源利用率和产出效益，拓展了发展空间，促进了传统农业的改造升级。然而，一方面，克氏原螯虾是甲壳类中分布最广的外来入侵物种；另一方面，大面积耕作改制会带来一定环境效应。为了科学地推进“稻虾共作”模式的发展和应用，本文拟从产业调查着手，结合试验示范、定位试验研究，分析“稻虾共作”模式的“双刃性”，为保证“稻虾共作”技术模式的合理规范应用和可持续发展提供依据。

1 稻虾共作模式的特点

稻虾共作属于一种稻田种养结合的生态农业模式，即在稻田中养殖小龙虾并种植水稻，在水稻种植期间，小龙虾与水稻在稻田中互利共生。2001 年，湖北省潜江市农民率先探索出稻田养殖小龙虾的“稻虾连作”模式，即通过在稻田开挖简易围沟的方式放养小龙虾，每年可收获“一稻一虾”。经过近 10 年的发展和研究，针对 1 年只能收获 1 季虾，且养虾时间和种稻时间冲突，插秧季节小龙虾生长规格不达标等问题，科研工作者和农户对该养殖模式进行了改进和完善，提出了“稻虾共作”的养殖模式。

所谓稻虾共作是指稻田全年种植 1 季中稻，养殖 2 季虾的种养结合生态高效模式。稻沟由原来的 1 m 宽、0.8 m 深的小沟，改挖成 4 m 宽、1.5 m 深的养殖沟(图 1)，水稻生长期间田沟相通,稻虾共生，部分时间(晒田、收获等)水稻田内搁干，小龙虾回到养

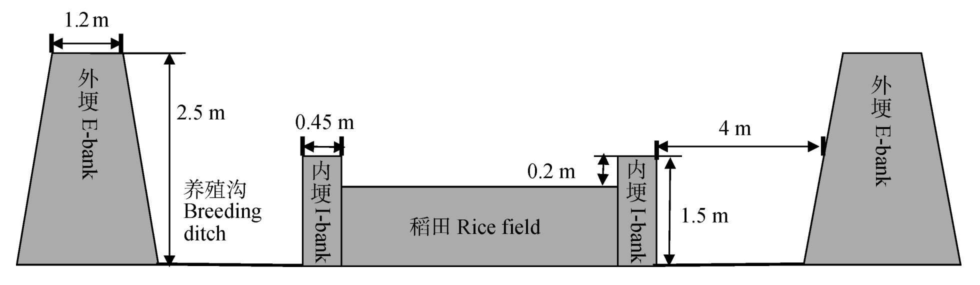


图 1 稻虾共作田间工程示意图

Fig. 1 Field layout of rice-crayfish culture system

殖沟，每年的 8—9 月水稻收割前投放亲虾，或 9—10 月水稻收割后投放幼虾，第 2 年的 4 月中旬—5 月下旬收获成虾，同时补投幼虾，5 月底 6 月初整田、插秧，8 月、9 月收获亲虾或商品虾，如此循环轮替(图 2)。这种模式有效提高了稻田的综合利用率，每公顷田可多产 750 kg 左右的成虾，解决了秋季无商品成虾产出的问题，并保证了成虾的质量和规格。

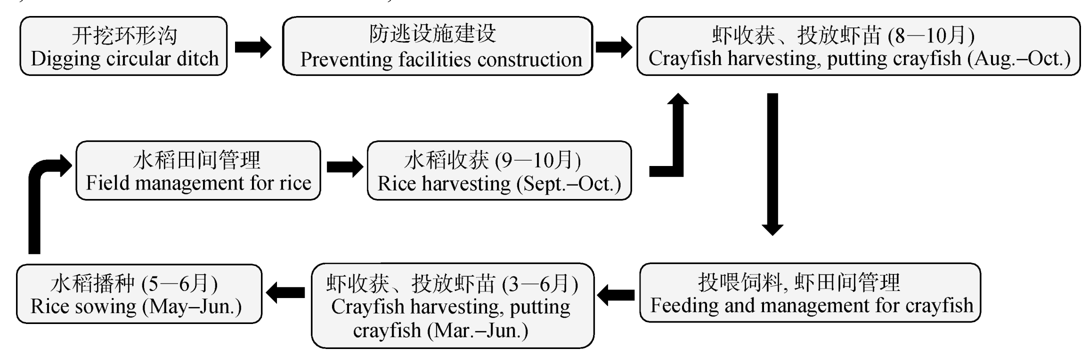


图 2　稻虾共作模式示意图

Fig. 2　Diagram for rice-crayfish culture system

2　我国稻虾共作模式的发展

小龙虾养殖最大区域主要集中在长江中下游地区，以湖北、江苏、安徽为主。湖北主要以稻虾共作模式为主，江苏则以虾蟹混养、鱼虾混养等模式为主。

稻虾共作模式中，使用无公害农药，且使用次数比常规稻田要少，生产的稻米是一种接近天然的生态稻；水稻生长过程中稻田的微生物及害虫为小龙虾提供了充足的饵料，小龙虾产生的排泄物又为水稻生长提供了良好的生物肥，形成了一种优势互补的生物链，使生态环境得到改善，实现生态增值。该模式提高了土地和水资源的利用率和小龙虾的产量、规格，同时改善了稻米的品质[2]。小龙虾产量 1 500 $kg\cdot hm^{-2}$ 左右，按规格不同，小龙虾收购价为 7.5~15 ¥$\cdot kg^{-1}$，小龙虾收益 4.5×10^4~9.0×10^4 ¥$\cdot hm^{-2}$；水稻售价 3.8 ¥$\cdot kg^{-1}$，产量 9 $t\cdot hm^{-2}$，产值达 3.42×10^4 ¥$\cdot hm^{-2}$；一年稻虾总产值达 7.5×10^4~1.2×10^5 ¥$\cdot hm^{-2}$。

由于稻虾共作模式效益好，促使全国“稻虾”面积迅速扩大，根据全国水产技术推广总站 2016 年发布的中国小龙虾产业发展报告[3]，全国小龙虾养殖面积超过 6×10^5 hm^2，其中稻虾综合种养模式占 70%，面积约 4.2×10^5 hm^2，且面积还在快速增长之中。湖北省潜江市是长江中下游稻区稻虾综合种养模式的发源地，2010 年潜江市稻虾共作面积不过 667 hm^2，2013 年增加 10 倍左右，2016 年底，增加到 2.11×10^4 hm^2。湖北省监利县，2016 年稻虾综合种养面积超过 1.0×10^4 hm^2，2017 年达 3.3×10^4 hm^2，而监利县可进行小龙虾养殖的稻田估算在 6.7×10^4 hm^2 以上(图 3)。

全国适宜稻虾综合种养的稻田面积占现有稻田面积的 15%左右。而国家统计局 2016 年的数据显示[4]，当年全国水稻播种面积达 3.02×10^7 hm^2，按照 15%的比例计算，适合稻虾综合种养的稻田面积高达 4.5×10^6 hm^2。

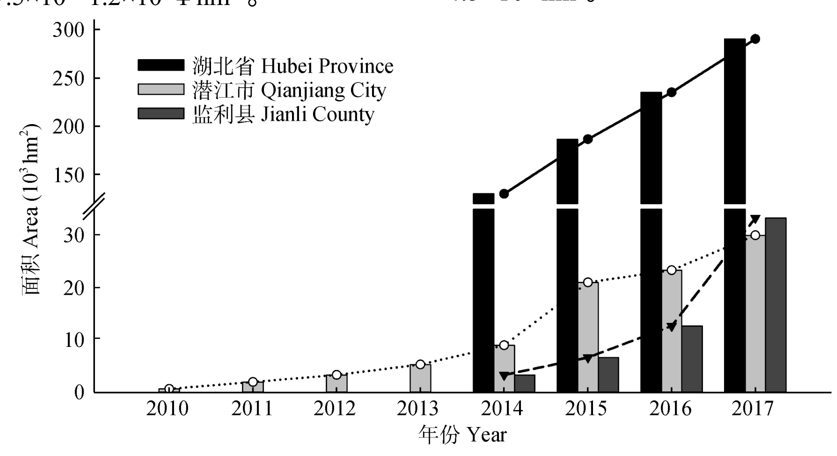


图 3　湖北省及重点县市稻虾共作面积变化

Fig. 3　Changes of areas of rice-crayfish culture in Hubei Province and typical city (county)

3　稻虾共作的生态效应及“双刃性”

3.1　稳粮增效与重虾轻稻

稻虾综合种养效益的增加，提高了农民种植水稻的积极性。从潜江的情况看，稻田总面积年年创新高，从 2010 年到 2017 年稻虾综合种养的稻田面积增加了 45 倍左右(图 3)。从表 1 可以看出，尽管稻虾共作模式中，种植水稻的面积减少(养殖沟面积占 8%)，但稻田总面积和单产并未减少，稻虾共作模式水稻产量比传统水稻种植模式增加 4.63%~14.01%(表 1)。

表 1　不同稻虾处理模式对水稻产量及品质的影响

Table 1　Effect of different treatments of rice-crayfish culture on rice yield and quality

处理 Treatment		产量 Yield		品质 Quality	
		产量 Yield (t·hm^{-2})	增产 Increasing rate (%)	垩白率 Chalky percentage (%)	垩白度 Chalky ratio (%)
稻虾共作 Rice-crayfish culture	F+NSR	9.6a	14.01	20.8c	6.6c
	F+SR	9.43a	12.00	19.8c	7.6bc
	NF+NSR	8.96ab	6.41	27.2b	8.2b
	NF+SR	8.81b	4.63	23.8bc	7.1c
水稻单作 Conventional rice culture		8.42b	—	30.3a	9.7a

F：投放饵料; NF：不投放饵料; SR：秸秆还田; NSR：秸秆不还田。同列不同小写字母表示在 P<0.05 水平差异显著。F: crayfish feeding; NF: non crayfish feeding; SR: straw return; NSR: non-straw return. Different lowercase letters in the same column mean significant differences at P < 0.05 level.

同时稻虾共作模式显著降低了稻米的垩白粒率和垩白度，改善了稻米的外观品质。此外，稻虾共作模式中小龙虾的排泄物和残存的虾饵料可以增加土壤肥力，小龙虾取食稻田杂草和虫子，可在一定程度上防除杂草和降低虫害，具有减少化肥农药使用、降低稻米化肥农药残留风险的作用，可显著提高稻米的市场价值。

实际生产中，由于小龙虾的效益是水稻的 2~3 倍，且水稻生产过程中播种、施肥、灌水、收获、储运等田间管理措施相对复杂，比较效益更不及小龙虾，导致经营者不愿意种植水稻。从湖北省监利县的情况看，2014 年以来稻虾综合种养面积增加了 10 倍左右(图 3)，而水稻种植面积反而有所下降，利用稻田养虾却不种植水稻的现象也较普遍。考虑到水稻可为小龙虾提供庇护所和食物，有利于小龙虾生长，经营者种植水稻主要是为了提高虾的产量，对水稻生产并无特别关注和投入，致使一些稻虾综合种养田水稻产量和品质下降。图 4 是 2016 年湖北省 20 个稻虾共作生产示范点水稻单产采样测产结果，平均产量为 6.4 t·hm^{-2}，远低于湖北省水稻平均单产，最高单产虽达到 11.3 t·hm^{-2}，但 50%的样点单产低于 6.0 t·hm^{-2}，而产量最低的只有 2.3 t·hm^{-2}。这种重虾轻稻、虾强稻弱现象也使稻虾共作模式失去了稻虾共生、稳粮增效的意义。

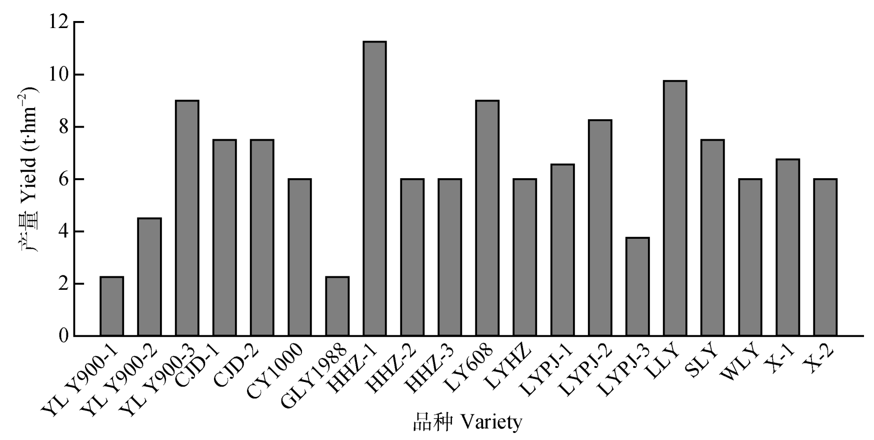


图 4　2016 年湖北省稻虾共作田不同水稻品种产量差异

Fig. 4　Yields of different rice varieties in rice-crayfish culture field in 2016 in Hubei Province

3.2　改良土壤与次生潜育化

稻虾共作适合在地下水位高的低湖田、落河田，要求养殖沟常年有水，且水资源充足。低湖田、涝渍地由于常年淹水、地下水位较高，往往造成稻田土壤次生潜育化，成为冷浸田、烂泥田。不同养虾年限的稻田土壤活性有机碳含量变化较大，其中易

氧化态碳含量高于常规水稻单作田，水溶性有机碳含量则低于常规水稻单作田；稻虾共作还可以增加土壤营养物质，如全氮、全磷、全钾的含量(表 2)，有效改善土壤肥力。其主要原因在于小龙虾在稻田的活动，如取食、排泄、打洞等，以及养虾对于土壤微生物群落和功能多样性的影响[5-6]。

表 2 稻虾共作与水稻单作土壤活性有机碳库和营养物质含量

Table 2 Soil labile organic carbon pool and nutrients contents of rice-crayfish culture and conventional rice culture

处理 Treatment	活性有机碳 Labile organic carbon pool		养分 Nutrient		
	易氧化态有机碳 Readily oxidizable organic carbon (mg·kg^{-1})	溶解性有机碳 Dissolved organic carbon (mg·kg^{-1})	全氮 Total nitrogen (g·kg^{-1})	全磷 Total phosphorus (g·kg^{-1})	全钾 Total potassium (g·kg^{-1})
稻虾共作 Rice-crayfish culture	5.55a	110.5b	1.01a	1.11a	13.20a
水稻单作 Conventional rice culture	3.43b	138.5a	0.32b	1.02b	11.45b

同列不同小写字母表示在 P<0.05 水平上差异显著。Different lowercase letters in the same column mean significant differences at P < 0.05 level.

稻虾共作对稻田土壤存在一些不良的影响，对地下水位不高的优质稻田土壤影响更为明显。图 5 显示稻虾共作对稻田土壤剖面结构及理化特性的影响，稻虾共作田土壤颜色偏暗，根系密度增高，土壤结构更为紧密、潜育化明显；而稻虾共作土壤脲酶活性和过氧化氢酶活性均低于常规水稻单作(图 6)。

3.3 涵养水源与水资源消耗

传统稻田水分循环是开放式的，稻田保持一定水层，分蘖后期、成熟期排水晒田，平时水多即排、水少即灌(图 7)，水分利用率不高；稻虾共作稻田养殖沟周年蓄水，与田面水沟通，整体储水功能增强，沟渠联通、排蓄结合，水分循环是封闭式的，水稻生产所需的排水和灌水主要来自养殖沟。地下水位高的低湖田、落河田实行稻田种养，水分利用率提高；地下水位低的灌溉稻田、丘陵岗地的垄田、山垅田实行稻田种养，有利于稻田蓄水、提高水分利用效率，一些丘陵地区采用稻虾共作，每公顷稻田蓄水量可增加 3 000 m^3，大大增强了抗旱能力[7]。研究表明，地下水位低的高磅地、砂壤土、漏水田、滩涂地等实行稻虾共作会增加水分消耗，地下水位低的灌溉稻田增加耗水量 50%~80%，一些水源不充足的丘陵岗地不宜实施稻虾共作。沟渠、水网不完善的稻田养殖系统水分利用率也会下降。同时，大面积的田间养殖工程系统，则会影响区域水文循环和水分利用，这种影响不容忽视[8]。

3.4 水质净化与水体富营养化

稻虾共作要求水体透明度在 30~40 cm 左右，水体过肥可导致纤毛虫大量繁殖和生长，危害小龙虾的生长。稻田动物的活动及其新陈代谢影响水体的溶氧量和养分，稻-鱼和稻-鸭模式的稻田水体溶解氧含量分别比水稻单作增加 56.0%和 54.0%[9]。稻虾共作的生态种养模式，也减少了农药化肥的施用量,减轻了由于重施农药化肥造成的农田环境污染。图 8 表明稻虾共作与水稻单作总的生产成本相近，为

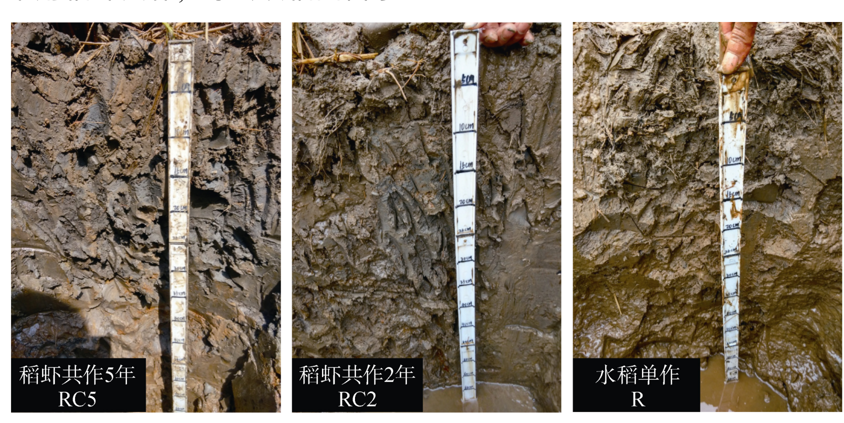


图 5 稻虾共作田与水稻单作田的土壤剖面

Fig. 5 Soil profiles of rice-crayfish culture and conventional rice culture

RC5、RC2 和 R 分别为稻虾共作 5 年、2 年和 0 年(水稻单作)。RC5 and RC2 mean rice-crayfish culture for 5 and 2 years of rice-crayfish culture. R means conventional rice culture.

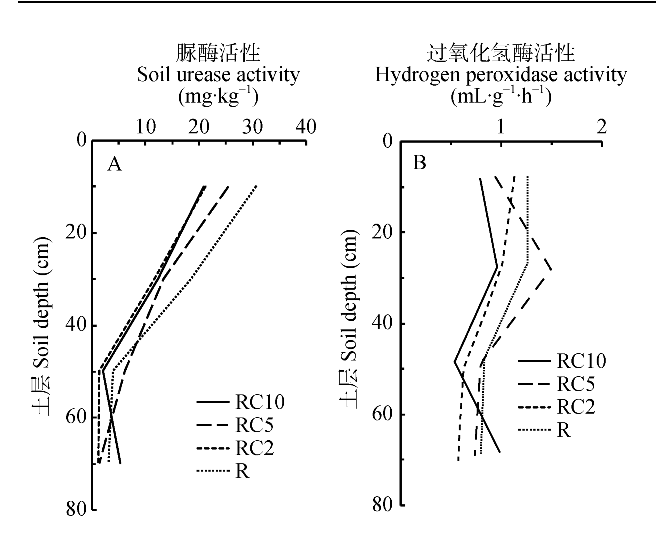


图 6　稻虾共作与水稻单作的土壤脲酶(A)和过氧化氢酶(B)活性

Fig. 6　Activities of soil urease (A) and hydrogen peroxidase (B) of rice-crayfish field and conventional rice field

RC10、RC5、RC2 和 R 分别为稻虾共作 10 年、5 年、2 年和 0 年(水稻单作)。RC10, RC5 and RC2 mean rice-crayfish culture for 10, 5 and 2 years of rice-crayfish culture. R means conventional rice culture.

1.8×10^4~2.1×10^4 ¥·hm^{-2}，稻虾共作模式成本中占比重较高的是虾苗和饲料，水稻单作成本中占比重较高的是肥料和农药，稻虾共作模式肥料成本降低79.5%，农药成本降低 50.0%。

但实际生产中，由于秸秆还田和饲料的投入，稻虾共作田田面水的全氮和全磷含量及硝态氮、氨态氮含量都高于水稻单作田(图 9)，实际生产中农民比较重视虾的产量，往往投放较多的饲料，所以稻虾共作有利于提高水体养分含量[10]，但同时也增加了水体富营养化的风险。

3.5　病虫草害有"抑"有"促"

稻虾共作对稻田病虫草害有较大影响。表 3 表明，随着稻虾共作年限的延长，虫害明显减少，稻飞虱(*Nilaparvata lugens*)、二化螟(*Chilo suppressalis*)、稻纵卷叶螟(*Cnaphalocrocis medinalis*)等得到控制(表 3)，特别是对二化螟的控制，主要是稻虾共作田冬季处于淹水状态，冬后二化螟幼虫基数为 0(表 4)。但是，从表 3 也看到，随着稻虾共作年限的延长，水稻茎基腐病显著加重，强润等[11]研究也表明稻虾模式水稻纹枯病、稻瘟病病情指数提高。

稻虾共作对田间杂草的控制效果也不能高估。从调查结果看，养虾后稻田杂草总量减少(图 10)，但随着养虾年限延长，部分杂草数量迅速回升，如千金子(*Euphorbia lathyris*)、稗草(*Echinochloa crusgalli*)和莎草(*Cyperus rotundus*)等。稻虾共作可部分控制通泉草(*Mazus japonicus*)、空心莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)和鳢肠(*Eclipta prostrata*)等杂草。

3.6　生物多样性有"升"有"降"

稻虾共作模式，一方面引入入侵生物小龙虾，改变了食物营养关系；另一方面改变田间结构、耕作制度及田间管理方式，因此会对稻田病虫草及生物多样性产生影响。研究结果表明，传统水稻单作稻田保持较高的生物多样性，实施稻虾共作后，由

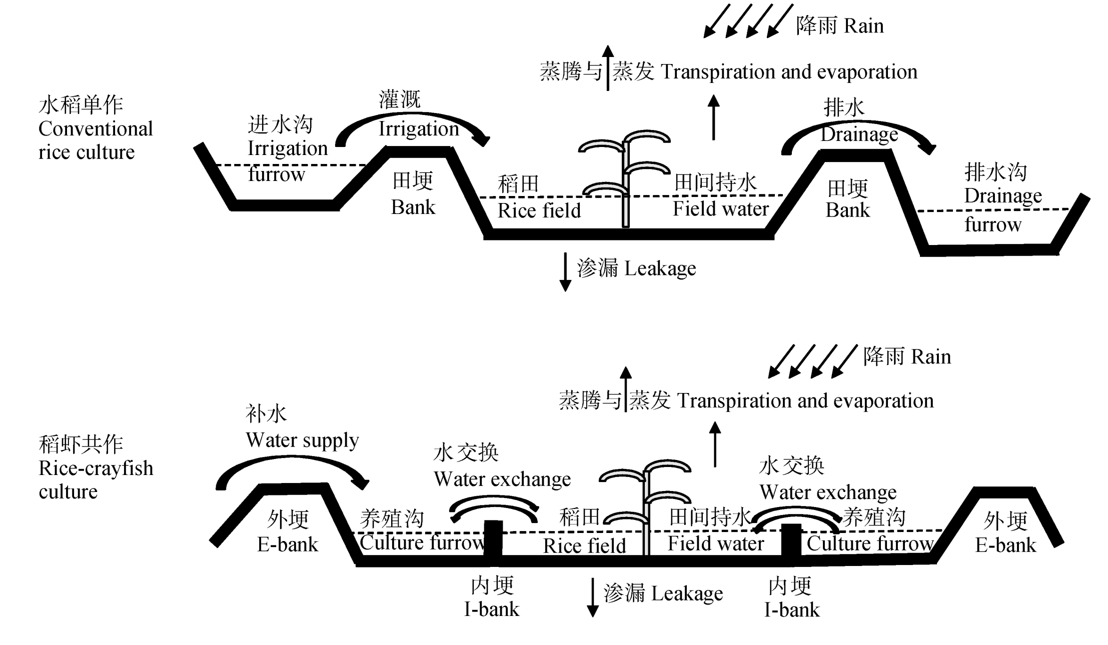


图 7　稻虾共作系统与水稻单作系统的水循环

Fig. 7　Water cycle of rice-crayfish culture and conventional rice culture

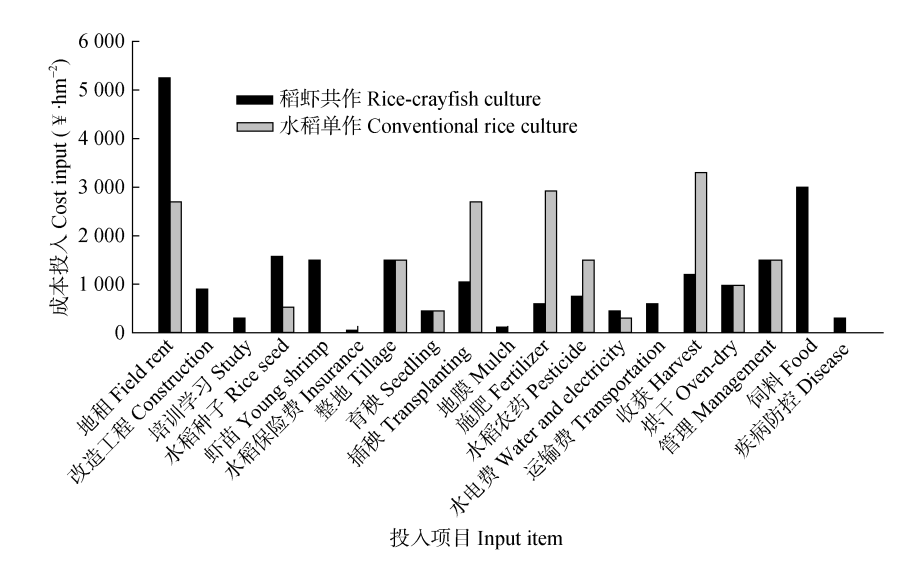


图 8 稻虾共作与水稻单作的成本投入

Fig. 8 Cost inputs of rice-crayfish culture and conventional rice culture

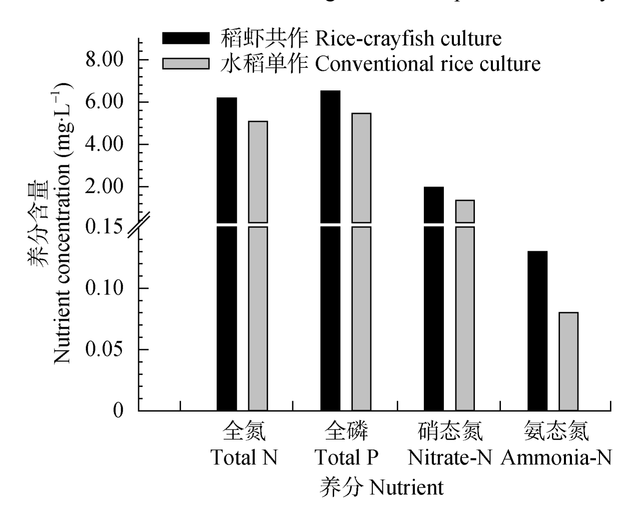


图 9 稻虾共作与水稻单作田面水中养分含量

Fig. 9 Nutrients concentrations in surface water of rice-crayfish field and conventional rice field

于田间工程的开挖，使稻田生物多样性下降，4 年以后才能逐步回升(图 11)。稻田昆虫受栽培模式影响较小，田间工程实施 1 年后即开始恢复(表 5)；昆虫总数均随稻虾年限呈先降后升的趋势；中性昆虫数量最多，植食性昆虫次之，寄生性昆虫最少；稻虾共作多年后保持较高的天敌数量，如蜘蛛(表 3)，但稻田杂草回升也较快(图 10)，特别是在直播条件下，部分恶性杂草会成为优势种。

4 稻虾共作的模式优化及建议

综上所述，我国稻虾共作模式迅猛发展，而全国适合稻虾共作的稻田潜力巨大，可达 4.5×10^6 hm^2。同时，研究结果表明，合理规范的稻虾共作，对稳粮增效、农民增收、绿色发展有重要意义；但盲目发展、不规范的管理也会带来一些负面影响。为了促进稻虾共作模式的可持续发展，须优化技术模式。

(1)因地制宜，避免盲目发展。研究和明确稻虾共作的最适稻田条件，规范发展条件及标准，如地下水位、土壤类型、水资源供给条件和水质环境等。稻虾共作应选择在阳光充足，生态环境良好，水源充足、远离污染，水质清澈、排灌方便的田块进行。地下水位低、砂性土壤、不保水的漏水田，水资源不充足的田块不适合进行稻虾共作。

(2)研究标准，规范化发展。主要从优质稻品种标准、稻田田间工程建设、稻田全年水分调控技术、小龙虾投食和水稻有机耦合肥料运筹技术、小龙虾健康生态养殖技术和稻田绿色防控技术等 6 个方面进行关键技术的标准化和规范化，生产出优质安全的生态稻虾产品。

(3)优化模式，科学水肥调控。研究稻虾共生关系，明确稻虾系统氮磷等营养物质循环规律，避免过量投入饵料及化肥，充分发挥其互利共生关系，保证系统物质循环利用。一方面，秸秆全量还田，减少秋冬饵料投入；另一方面，早春适量种草，春夏适量投入饵料,减少化肥投入；再者注意科学管水，以水调肥、水肥耦合，保证水质优良、小龙虾健康。

(4)因势利导，防治病虫草害。研究稻虾共作田生物多样性，保证其相生相克、互利共生，明确稻虾共作系统病虫草害的发生规律。生物多样性是系统平衡、防治病虫草害的基础，一方面，早春在养殖沟、田埂种草，保持其优势种群，如苦草(*Vallisneria natans*)、轮叶黑藻(*Hydrilla verticillata*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)，水稻种植前进行稻田除草；另一方面，利用生物多样性、农艺措施及物理措施综合防治病虫害。

表 3 不同年限稻虾共作稻田病虫害发生情况

Table 3 Pests and diseases occurrence in rice-crayfish fields cultured for different years

稻虾共作年限 Rice-crayfish year (a)	稻飞虱数量 Planthopper (individuals·m^{-2})	枯心率 Dead heart rate (%)	卷叶率 Roled leaf rate (%)	蜘蛛数量 Spider (individuals·m^{-2})	稻曲病株数 False smut (plants·m^{-2})	基腐病发病率 Basal rot rate (%)
0	380	5.2	9.8	20	24	5.2
1	634	3.2	5.4	22	22	5.6
2	350	1.9	4.9	20	20	17.8
3	0	0.5	10.7	25	3	19.3
6	0	0.8	2.2	28	7	28.9

表 4 稻虾共作田和水稻单作田二化螟幼虫越冬基数

Table 4 Over-wintering cardinal larvae numbers of *Chilo suppressalis* in rice-crayfish field and conventional rice field

时间 Time	调查点 1 Location 1		调查点 2 Location 2		调查点 3 Location 3	
	水稻单作 Conventional rice culture	稻虾共作 Rice-crayfish culture	水稻单作 Conventional rice culture	稻虾共作 Rice-crayfish culture	水稻单作 Conventional rice culture	稻虾共作 Rice-crayfish culture
冬前 Before wintere	27A	13B	12A	5B	23A	13B
冬后 After winter	21A	0B	9A	0B	19A	0B

同一调查点同行不同大字母表示不同稻作模式在 P<0.01 水平差异显著。Different capital letters mean significant differences at P < 0.01 level between conventional rice culture and rice-crayfish culture within one location.

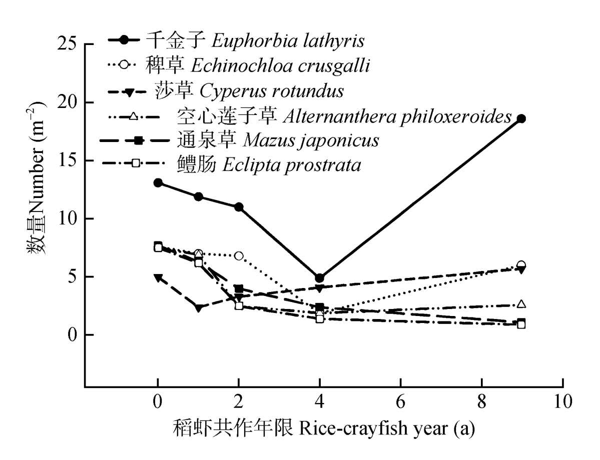


图 10 稻虾共作田杂草数量随共作年限的变化

Fig. 10 Change of weeds quantities in rice-crayfish field with years

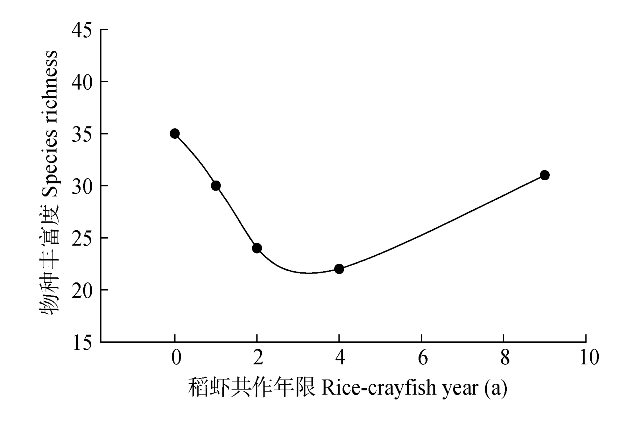


图 11 稻虾共作系统物种丰富度的变化

Fig. 11 Change of species richness in rice-crayfish culture system

表 5 稻虾共作田和水稻单作田昆虫数量

Table 5 Insects numbers in rice-crayfish field and conventional rice field

稻虾共作年限 Rice-crayfish years (a)	植食性昆虫 Herbivorous insects (individuals·m^{-2})	捕食性昆虫 Predatory insects (individuals·m^{-2})	中性昆虫 Neutral insects (individuals·m^{-2})	寄生性昆虫 Parasitic insects (individuals·m^{-2})	总数 Total amount (individuals·m^{-2})
0	21.0cd	6.3cd	24.0b	1.3c	52.6b
1	20.3de	5.0de	20.0cd	0.3e	45.6c
2	18.7e	4.1e	18.0d	0.7d	41.5c
3	23.3bc	7.0c	21.7c	1.5bc	53.5b
4	25.4b	9.0b	32.0a	1.7b	68.1a
9	29.3a	11.7a	31.3a	2.3a	74.6a

参考文献 References

[1] 秦尊文. 以“虾稻共作”模式为抓手推进体制机制创新——潜江市全国中小城市综合改革的观察与思考[J]. 中国发展, 2016, 160(6): 51–56
Qin Z W. Propel the innovation of system and mechanism with the “Cray-Rice Cooperation” mode — Observation and reflection of comprehensive reform in Qianjinag as a nationwide small-medium city[J]. China Development, 2016, 160(6): 51–56
[2] 陈灿, 黄璜, 郑华斌, 等. 稻田不同生态种养模式对稻米品质的影响[J]. 中国稻米, 2015, 21(2): 17–19
Chen C, Huang H, Zheng H B, et al. Effects of different mode of ecological planting and raising on rice quality[J]. China Rice, 2015, 21(2):17–19
[3] 中国水产技术推广总站. 中国小龙虾产业发展报告[R]. 中国水产技术推广总站, 2016
National Aquaculture Technology Diffusion Terminus of China. China Report of Development of Crayfish Industry[R]. National Aquaculture Technology Diffusion Terminus of China, 2016
[4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2016
[5] 佀国涵, 彭成林, 徐祥玉, 等. 稻-虾共作模式对涝渍稻田土壤微生物群落多样性及土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2016, (3): 503–509
Si G H, Peng C L, Xu X Y, et al. Effects of rice-crayfish integrated mode on soil microbial functional diversity and fertility in waterlogged paddy field[J]. Soils, 2016, (3): 503–509
[6] Si G, Peng C, Yuan J, et al. Changes in soil microbial community composition and organic carbon fractions in an integrated rice-crayfish farming system in subtropical China[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 2856
[7] 向继恩, 陈灿, 黄璜. 稻田养鱼农业文化遗产综合效益评价[J]. 遗产与保护研究, 2016, 1(5):111–117
Xiang J L, Chen C, Huang H. Evaluation of comprehensive benefits of agriculturai heritagva in fish culture in the rice field[J]. Research on Heritages and Preservation, 2016, 1(5): 111–117
[8] 李胜龙, 张海林, 刘目兴, 等. 稻田——田埂过渡区土壤水分运动与保持特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 122–128
Li S L, Zhang H L, Liu M X, et al. Characteristics of soil water transport and holding capacity in paddy and inner field-bund transition zones[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 122–128
[9] 王缨, 雷慰慈. 稻田种养模式生态效益研究[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 311–316
Wang Y, Lei W C. Studies on the ecological effect of planting-breeding models in the rice field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(2): 311–316
[10] 毛栽华, 丁凤琴, 周洵, 等. 克氏原螯虾稻虾连作水质稳定性的研究[J]. 中国水产, 2015, (5): 71–72
Mao Z H, Ding F Q, Zhou X, et al. Study on effect of rice-crayfish culture on stability of water quality[J]. China Fisheries, 2015, (5): 71–72
[11] 强润, 洪猛, 王家彬, 等. 几种种养模式对水稻主要病虫草害的影响[J]. 农业灾害研究, 2016, 6(5): 7–9
Qian Y, Hong M, Wang J B, et al. Effect of several planting and breeding patterns on main diseases, pests and weeds occurrence in rice fields[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2016, 6(5): 7–9